



## 1. Tytuł projektu:

Technologie materiałów półprzewodnikowych dla elektroniki dużych mocy i wysokich częstotliwości

## 2. Słowa kluczowe

3. Energoelektronika, SiC, GaN, Napęd SRM, Modułarny przekształtnik wielopoziomowy, Przekształtnik napięcia, Przekształtnik DC/DC o topologii podwójnego mostka typu H, Wielogłęziowy przekształtnik napięcia DC/DC

## 4. Instytucja finansująca (nr umowy)

Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (TECHMATSTRATEG1/346922/4/NCBR/2017)

## 5. Okres realizacji

01.01.2018-31.05.2021

## 6. Dofinansowanie (w tym w 2021)

1 348 250,00

## 7. Partnerzy

Instytut Mikroelektroniki i Optoelektroniki Politechniki Warszawskiej  
Instytut Radioelektroniki i Technik Multimedialnych Politechniki Warszawskiej  
Wydział Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej  
Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych  
Politechnika Wroclawska  
Instytut Technologii Elektronowej

## 8. Kierownik projektu

dr hab. inż. Arkadiusz Kaszewski

## 9. Zespół projektowy

mgr inż. Andrzej Straś

mgr inż. Tomasz Bałkowiec

mgr inż. Krzysztof Jackiewicz

dr inż. Michał Gierczyński

mgr inż. Tomasz Miazga



mgr inż. Monika Jakubowska  
prof. dr hab. inż. Lech Grzesiak  
dr hab. inż. Bartłomiej Ufnalski  
dr inż. Andrzej Gałęcki  
dr inż. Marek Michalczuk  
inż. Michał Szczyrek  
inż. Bogdan Bednarski

### 10. Cel projektu (max. 1000 znaków)

W ramach zadania realizowanego przez Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej Politechniki Warszawskiej jest opracowanie rekonfigurowanej otwartej platformy demonstrującej działanie układów energoelektronicznych zbudowanych w oparciu o komercyjne przyrządów mocy SiC/GaN.

### 11. Streszczenie (max. 1 strona)

Głównym celem projektu jest rozwój technologii homoepitaksji węgla krzemu (SiC) oraz heteroepitaksji azotku galu (GaN) w kierunku struktur epitaksjalnych o jakości produkcyjnej przeznaczonych do wytwarzania dedykowanych przyrządów półprzewodnikowych. Podstawowymi produktami opracowywanymi z myślą o wdrożeniu będą struktury epitaksjalne SiC dla przyrządów w klasie napięciowej 1,7kV oraz 3,3kV a także struktury epitaksjalne AlGaN/GaN/SiC przeznaczone do wytwarzania wertykalnych tranzystorów HEMT. Jakość rozwijanych produktów zostanie zweryfikowana poprzez opracowanie demonstratora diod SiC PiN na napięcie 1,7kV oraz tranzystorów VHEMT. Równolegle przewidziano realizację prac zmierzających do opracowania demonstratora lateralnego, wielobramkowego tranzystora HEMT wykonanego w technologii GaN-on-Si na napięcie zaporowe 600V o wydajności prądowej przekraczającej 10A. Wszystkie demonstratory przyrządów półprzewodnikowych powinny uzyskać w wyniku realizacji projektu stan rozwoju pozwalający na ich wdrożenie w zaawansowanych przekształtnikach energoelektronicznych.

Wyniki prac rozwojowych związanych z opracowaniem przekształtników energoelektronicznych oraz wzmacniaczy mikrofalowych na pasma lotnicze będą szeroko publikowane nie tylko w środowisku naukowym, ale przede wszystkim w



środowisku biznesowym w celu znalezienia firm zainteresowanych uzyskanymi rezultatami i wdrożeniami kolejnych produktów. Decyzja członków konsorcjum o włączeniu tego typu opracowań do zakresu proponowanego projektu jest podyktowana bardzo dużą inercją związaną z przyjmowaniem się na rynku nowoczesnych rozwiązań układowych i systemowych w zakresie zaawansowanych przekształtników energoelektronicznych, która wynika z przyzwyczajień, a często z ograniczonej wiedzy projektantów o wykorzystaniu przyrządów wytwarzanych w oparciu o półprzewodniki szerokopasmowe.

### **12. Dotychczasowe osiągnięcia (max 2000 wyrazów)**

W ramach projektu zrealizowano demonstrator technologii złożony z układów przekształtnikowych wykorzystujących łączniki z węgla krzemu oraz azotku galu. Przy użyciu tranzystorów SiC Mosfet zostały opracowane: prostownik aktywny, czterogątełziowy falownik napięcia, przekształtnik DC/DC, przekształtnik DC/DC w topologii podwójnego mostka aktywnego, przekształtnik napięcia dla napędu z silnikiem prądu przemiennego o magnesach trwałych. Wykonane zostały również przekształtniki wykorzystujące łączniki GaN HEMT: ośmiogątełziowy przekształtnik dla układu napędowego z maszyną reluktancyjną przełączalną oraz modułarny przekształtnik wielopoziomowy, sześciogątełziowy przekształtnik DC/DC. Układy sterowania zostały zrealizowane z wykorzystaniem, opracowanej w ramach projektu, autorskiej elektronicznej platformie sterującej zawierającej procesory sygnałowe, układ FPGA, przetworniki analogowo-cyfrowe, wejścia i wyjścia cyfrowe oraz układ umożliwiający komunikację z wykorzystaniem magistrali CAN. Platforma została zrealizowana w taki sposób, że możliwe jest jej dogodne konfigurowanie na potrzeby sterowania pracą każdego ze zrealizowanych przekształtników. Zostały również zaprojektowane obwody drukowane zawierające tranzystory GaN HEMT, sterowniki bramkowe oraz kondensatory (realizujące obwody pośredniczące napięcia stałego). Zrealizowane przekształtniki zostały zbadane oraz umieszczone w jednej szafie przemysłowej. Wykonano system wymiany informacji między przekształtnikami i komputerem, wykorzystujący magistralę CAN. System umożliwia zadawanie parametrów pracy przekształtników oraz odczytywanie danych diagnostycznych. Wykonany demonstrator technologii umożliwia jednoczesną pracę kilku przekształtników. Ponadto, została zaproponowana nowatorska metoda redukcji tętnień momentu obrotowego dla układu napędowego z wykorzystaniem maszyny reluktancyjnej przełączalnej. Opracowany system sterownia wykorzystuje zmodyfikowany regulator wielooscylacyjny wyzwalany ze stałym przyrostem kąta. Rozwiązanie jest obecnie w trakcie procedury patentowania. Opracowano także procedurę projektową syntezy regulatorów i algorytm kompensacji składowej przejściowej prądu transformatora dla przekształtnika



DC/DC o topologii podwójnego motka aktywnego w przypadku modulacji z pojedynczym przesunięciem fazowym.

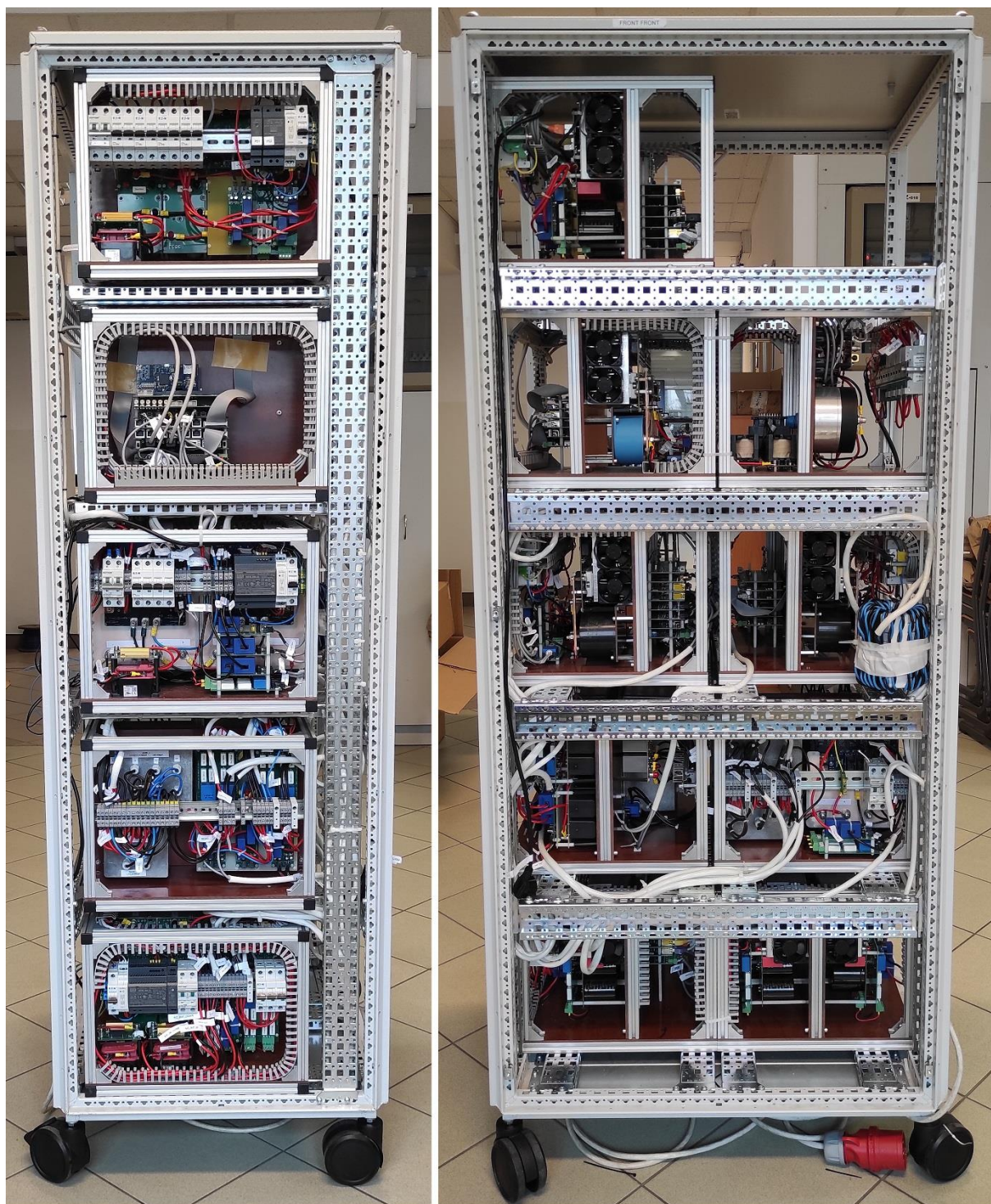
### **13. Publikacje**

1. Andrzej Straś, Krzysztof Jackiewicz, Tomasz Miazga, Tomasz Bałkowiec, Michał Gierczyński, Arkadiusz Kaszewski, "Modularny Przekształtnik Wielopoziomowy z Wykorzystaniem Półprzewodników z Azotku Galu", XVIII Krajowa Konferencja Elektroniki, Darłówko Wschodnie , 2019,
2. Krzysztof Jackiewicz, Tomasz Bałkowiec, Andrzej Straś, Tomasz Miazga, Michał Gierczyński, Arkadiusz Kaszewski, "Przekształtnik energoelektroniczny z łącznikami GaN dla układu napędowego z maszyną reluktancyjną przełączalną.", XVIII Krajowa Konferencja Elektroniki, Darłówko Wschodnie , 2019,
3. Andrzej Straś, Krzysztof Jackiewicz, Tomasz Bałkowiec, Tomasz Miazga, Michał Gierczyński, Arkadiusz Kaszewski, "Laboratory test bench for Gan- and SiC- based power electronics converters.", TRUMPF Hüttinger, 10th International Conference on Power Electronics for Plasma Engineering, Zielonka , 2019,
4. Krzysztof Jackiewicz, Tomasz Bałkowiec, Andrzej Straś, Tomasz Miazga, Michał Gierczyński, Arkadiusz Kaszewski, "Thermal aspects of GaN-based power electronic converter, TRUMPF Hüttinger, 10th International Conference on Power Electronics for Plasma Engineering, Zielonka , 2019,
5. Andrzej Straś, Krzysztof Jackiewicz, Tomasz Miazga, Tomasz Bałkowiec, Michał Gierczyński, Arkadiusz Kaszewski, "Modularny Przekształtnik Wielopoziomowy z Wykorzystaniem Półprzewodników z Azotku Galu", Przegląd Elektrotechniczny, 2019.
6. Michał Gierczyński, Lech Grzesiak, Arkadiusz Kaszewski, Tomasz Bałkowiec, Krzysztof Jackiewicz, Tomasz Miazga, Andrzej Straś, "Projekt przekształtnika DC/DC w topologii podwójnego mostka aktywnego (DAB) dla układu laboratoryjnego do badania baterii litowo-jonowych", XIX Krajowa Konferencja Elektroniki, Darłówko Wschodnie, 2020

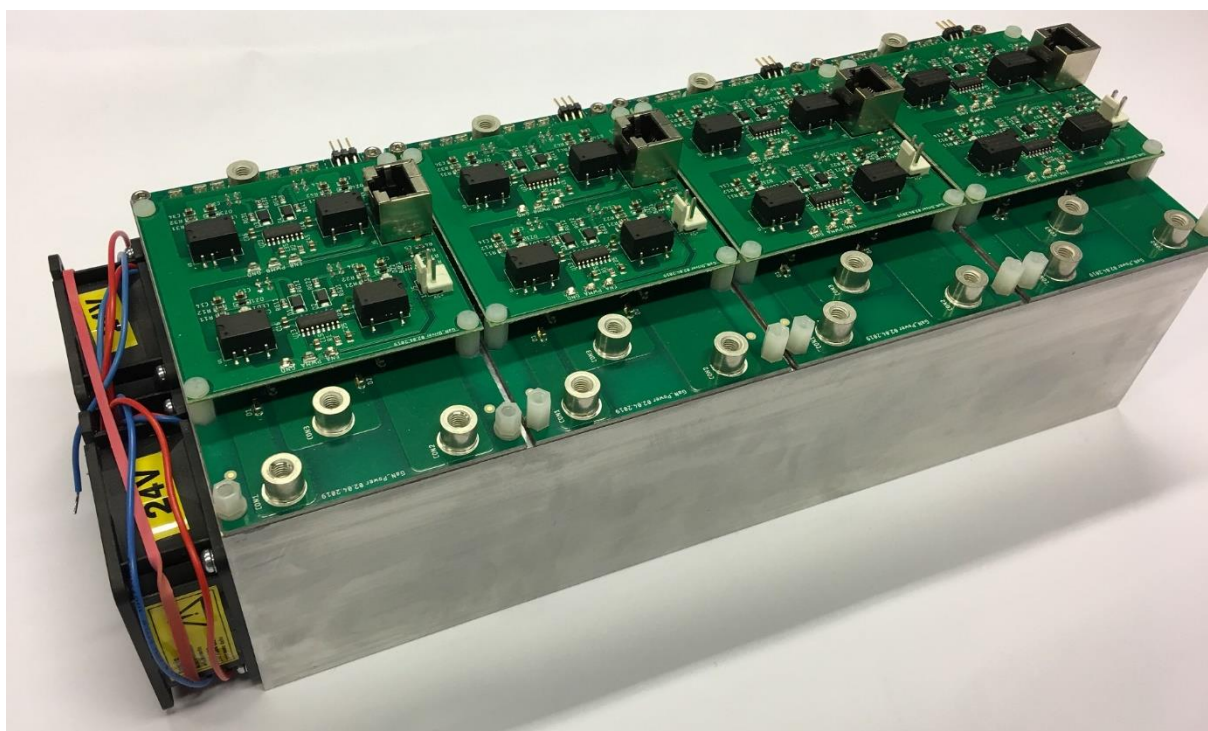


7. Krzysztof Jackiewicz, Tomasz Bałkowiec, Andrzej Straś, Arkadiusz Kaszewski, "Układ sterowania maszyną reluktancyjną przełączalną z wykorzystaniem regulatora wielooscylacyjnego pracującego w funkcji kąta do redukcji pulsacji momentu obrotowego", XIX Krajowa Konferencja Elektroniki, Darłówko Wschodnie, 2020,
8. Krzysztof Jackiewicz, Arkadiusz Kaszewski, Andrzej Straś, Bartłomiej Ufnalski, Tomasz Bałkowiec, "Torque ripple reduction technique for a switched reluctance motor", 22nd European Conference on Power Electronics and Applications EPE'20 ECCE, Lyon, 2020,
9. Michał Gierczyński, „Analiza pracy przekształtnika DC/DC o topologii DAB z filtrem prądu oraz synteza układu regulacji w przypadku modulacji z pojedynczym przesunięciem fazowym”, rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, 2020
10. Michał Gierczyński, Lech Grzesiak, Arkadiusz Kaszewski, Tomasz Bałkowiec, Krzysztof Jackiewicz, Tomasz Miazga, Andrzej Straś, "Projekt przekształtnika DC/DC w topologii podwójnego mostka aktywnego (DAB) dla układu laboratoryjnego do badania baterii litowo-jonowych.", Przegląd Elektrotechniczny, 2021,
11. Krzysztof Jackiewicz, Andrzej Straś, Tomasz Bałkowiec, Arkadiusz Kaszewski, "Układ sterowania maszyną reluktancyjną przełączalną z wykorzystaniem regulatora wielooscylacyjnego pracującego w funkcji kąta do redukcji pulsacji momentu obrotowego.", Przegląd Elektrotechniczny, 2021,

#### **14. Materiały graficzne**



Rys. 1. Zdjęcie demonstratora technologii SiC/GaN. Widok z boku oraz od frontu.

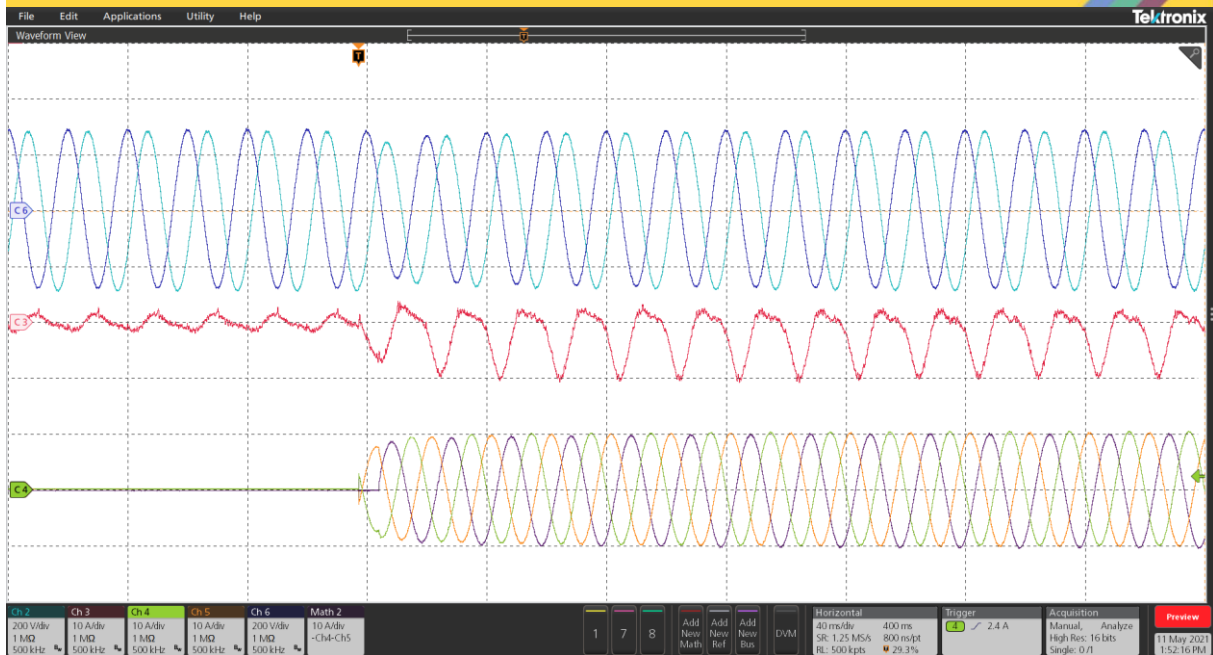


Rys. 2. Moduł mocy złożony z czterech mostków H oparty na tranzystorach GaN HEMT wraz ze sterownikami bramkowymi.



Rys. 3. Platforma sterująca modułowego przekształtnika wielopoziomowego.

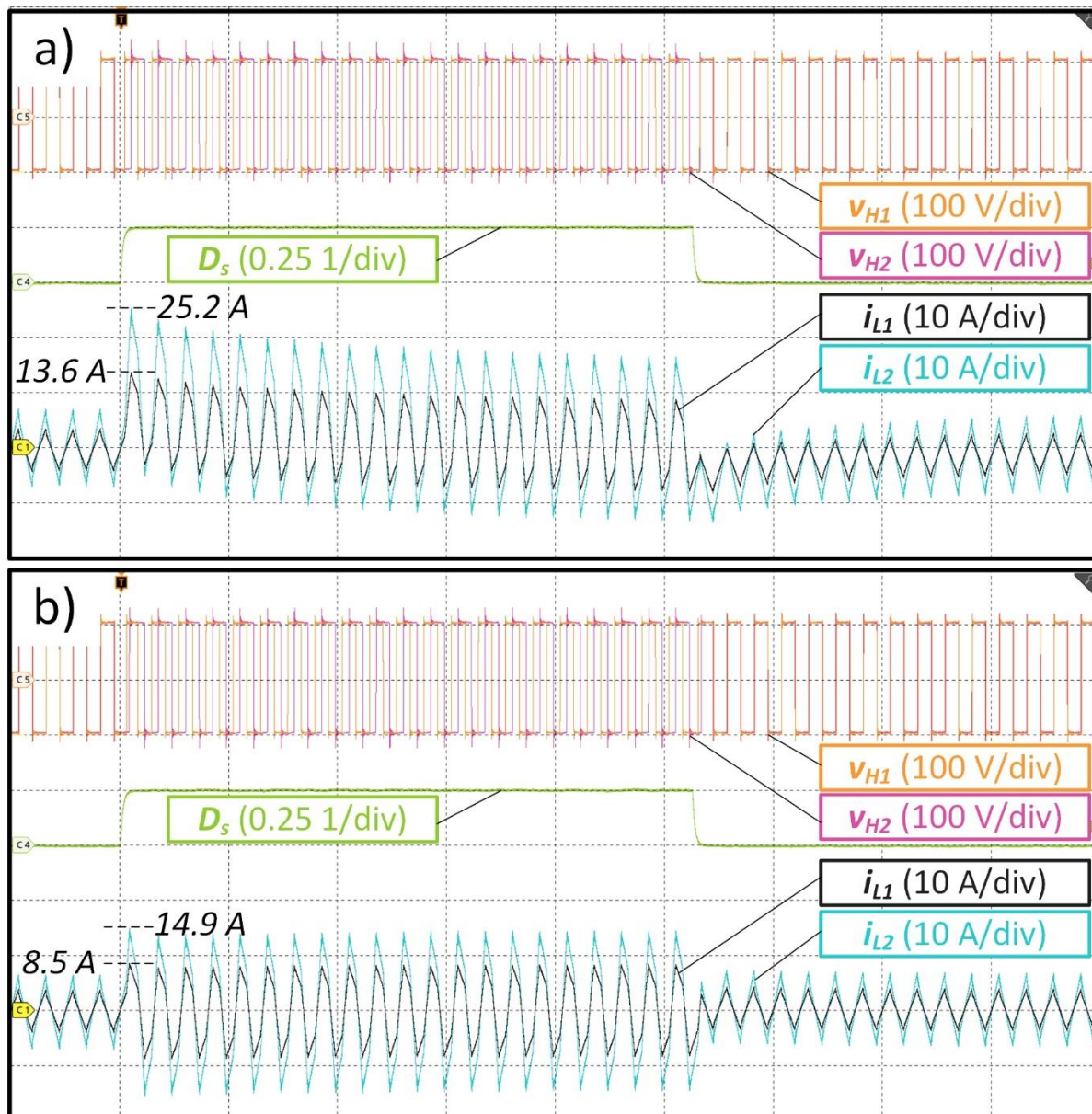




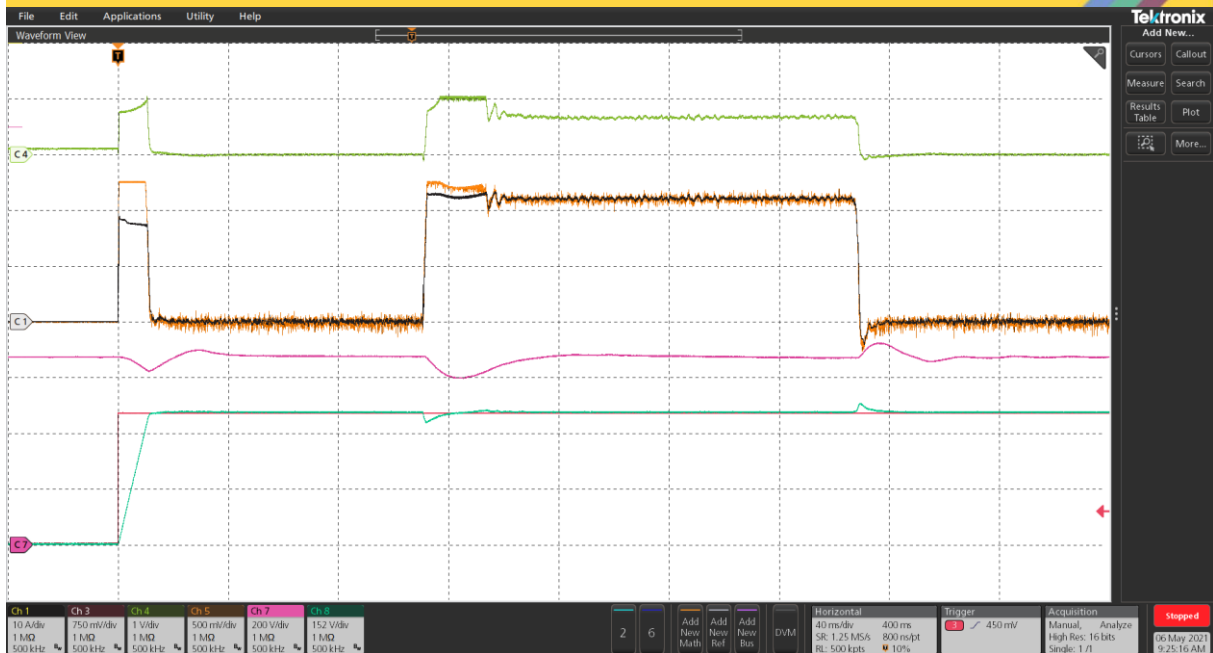
Rys. 4. Przebiegi dla modułowego przekształtnika wielopoziomowego podczas załączenia odbiornika rezystancyjnego. Przedstawiono dwa napięcia na kondensatorach filtra wyjściowego (kolor niebieski i błękitny), prąd jednego z ramion (czerwony) oraz prądy odbiornika.



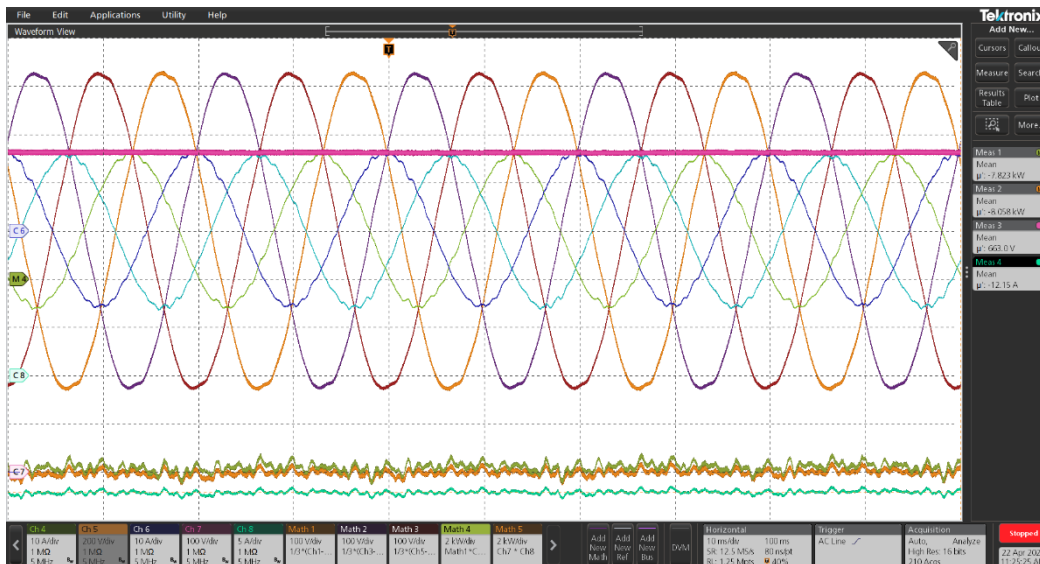
Rys. 5. Przebiegi prądów fazowych (żółto - zielony, pomarańczowy, zielony, fioletowy), prędkości kątovej (czarny, niebieski) oraz kąta położenia wirnika (czerwony) dla układu napędowego z maszyną reluktancyjną przelączalną.



Rys. 6. Przebiegi obrazujące pracę algorytmu kompensacji składowej przejściowej prądu transformatora dla podwójnego mostka aktywnego (przekształtnik DAB). Zamieszczono przebiegi bez kompensacji a) oraz z kompensacją b) dla porównania. Celem algorytmu jest eliminacja składowej przejściowej z przebiegów prądu  $i_{L1}$  (czarny) oraz  $i_{L2}$  (turkusowy).



Rys. 7. Przebiegi obrazujące pracę układu regulacji napięcia na podwójnego mostka aktywnego (przekształtnik DAB) podczas startu układu oraz załączenia/wyłączenia obciążenia: napięcie wejściowe regulowane przez prostownik aktywny (CH7 - fioletowy); napięcie zadane (Ch3 - czerwony); napięcie zmierzone (Ch8 - turkusowy); prąd zadany (Ch5 - pomarańczowy); prąd zmierzony (Ch1 - czarny); przesunięcie fazowe (Ch4 - zielony).



Rys. 8. Przebiegi prądów i napięć obrazujących pracę prostownika aktywnego.



Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej

WidePower

2020-01-12 19:31:40



# WidePower

Technologies of semiconductor materials for  
high power and high frequency electronics



TECHMAT  
STRATEG

Warsaw University  
of Technology



Faculty of Electrical  
Engineering  
WARSAW UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Rys. 9. Ekran powitalny panelu HMI demonstratora technologii.

Politechnika  
Warszawska

